材料強度学（2）

前回の復習と補足1

○　金属（合金）結晶中の格子欠陥：点欠陥（空孔、格子間原子）、線欠陥（**転位**）、面欠陥（粒界、表面）

○　塑性変形は、主として転位運動（**すべり**）によって起こる

○　転位：**すべり面**上ですでにすべった領域とまだすべっていない領域との境界線

○　１本の転位が動くことによる単位のすべり変形を**バーガースベクトル** b で表現

○　転位（線）の方向を表わす単位ベクトルを t とすると、

　刃状転位　$b \perp t$、**らせん転位**　$b \,//\, t$、**混合転位**　それ以外

○　**バーガースベクトルの保存則**：与えられた転位のbは、転位のどの部分をとっても不変で、転位は結晶内部に端点をもたない

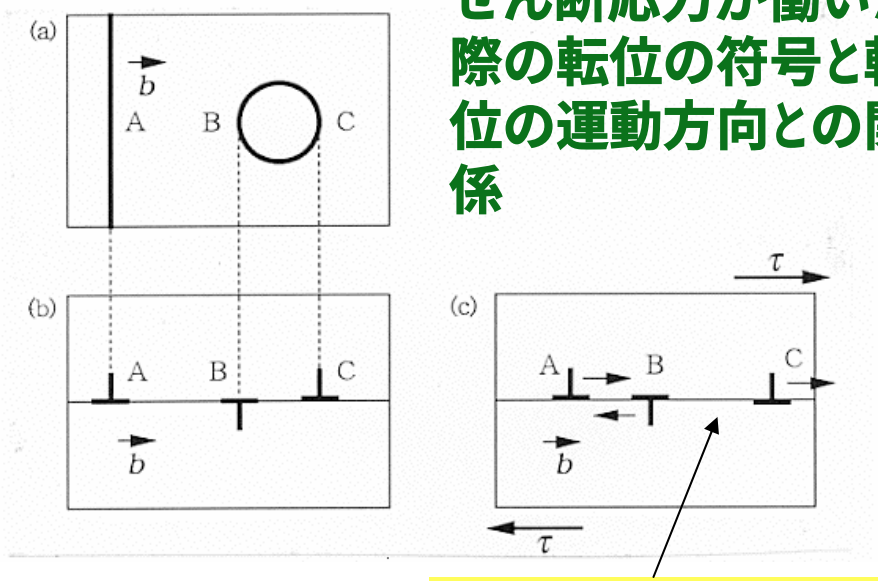
○　可能な転位形状：線状（端点は表面か粒界）、閉じたループ状、（**転位ループ**）、枝分かれ（**転位網**）

○　転位の量（数）の表現法：単位体積あたりに含まれる転位長さの総和、**転位密度 ρ**（m^{-2}）

前回の復習と補足2

○　転位のまわりには弾性ひずみ場が存在
○　転位のまわりの弾性ひずみ場は相互作用し、各々の転位に力が加わる：斥力、引力
　(転位の再配列、消滅、転位双極子の形成)
○　転位の増殖：塑性変形中に転位密度は増加 (加工硬化)
○　すべりは、特定の結晶面 (すべり面) で、特定の方向 (すべり方向) に起こる
○　すべり系：すべり面とすべり方向の組み合わせ (すべり面：一般に面密度最大、すべり方向：線密度最大)
○　単結晶のすべり：分解せん断応力が、臨界値に達したとき、最も都合のよい方位のすべり系で生じる (降伏)
○　結晶表面には段差 (すべり線、すべりステップ) が発生

せん断応力が働いた際の転位の符号と転位の運動方向との関係



転位ループは拡大する

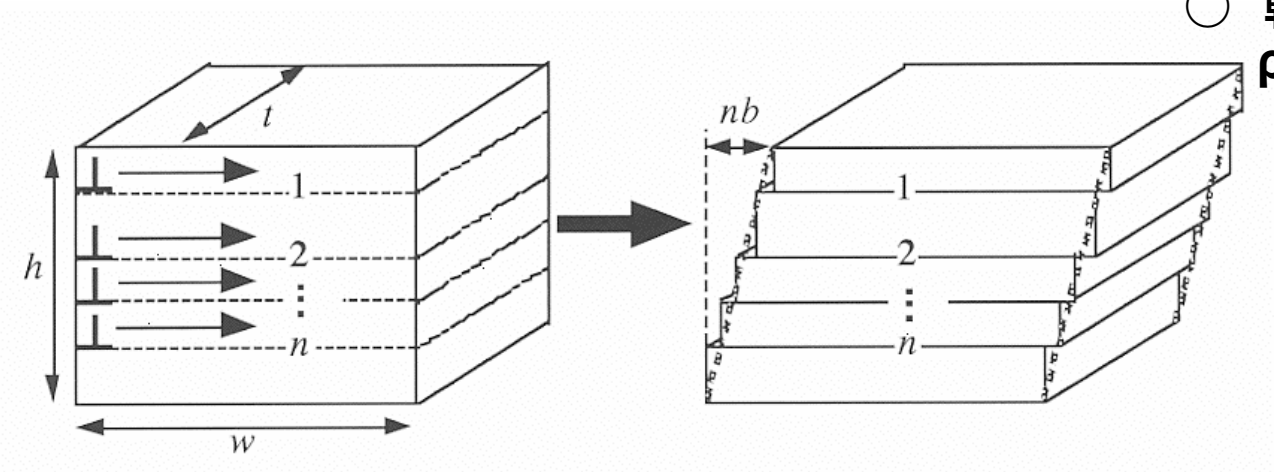
転位の運動と巨視的なせん断ひずみとの関係

○　1本の転位の運動によりすべり面上下にはb だけのずれが生じる

○　結晶（高さh、幅w、厚さt）に含まれる長さtのn本の転位が右方向に距離w運動すると、せん断ひずみは、$\gamma = nb / h$（bはbの大きさ）

○　転位が平均距離x（$x < w$）動いた場合は、$\gamma = (nb / h)(x / w)$

○　転位密度の定義：
$\rho = nt / hwt = n / hw$



$$\gamma = \rho bx$$

らせん転位と刃状転位の違い

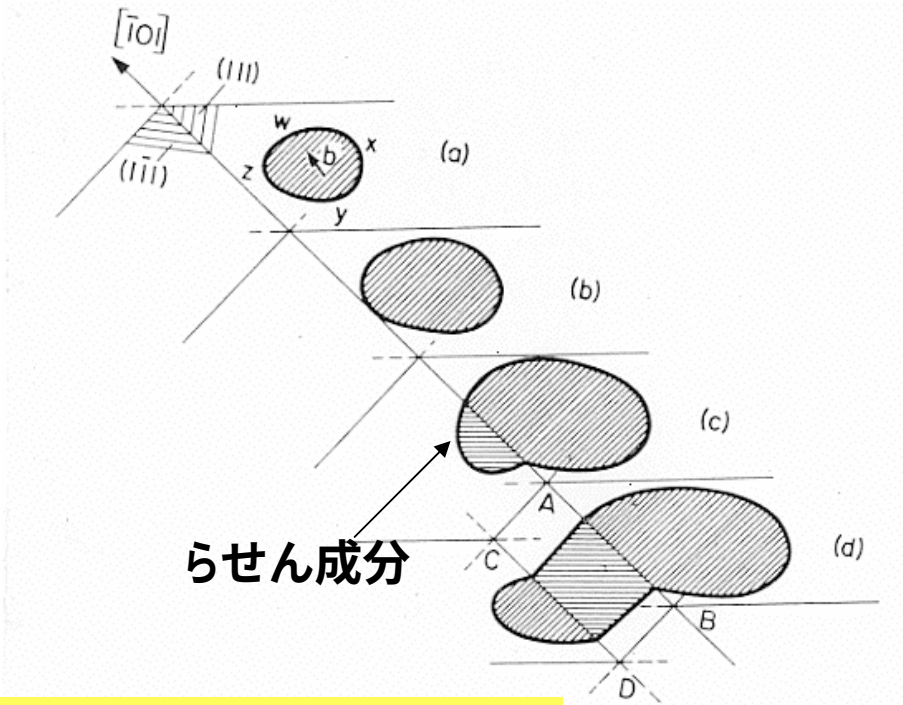
すべり面：b と t で形成される面

○ 刃状転位　$b \perp t$

すべり運動はひとつの面に限定

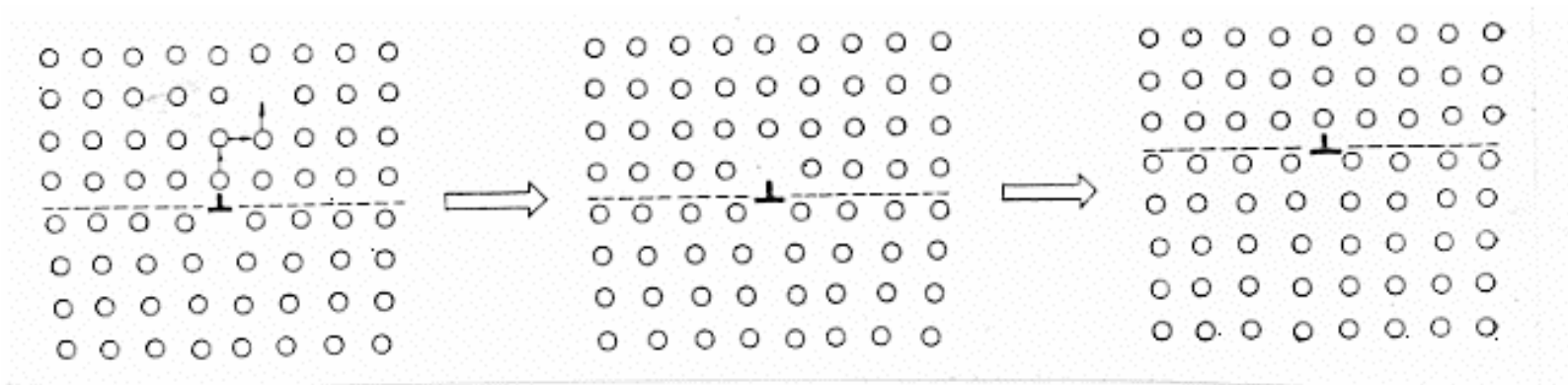
○ らせん転位　$b \,//\, t$

転位線を含むすべてのすべり面ですべりが可能



らせん転位は運動の途中で他の面へ移動可能（交差すべり）

刃状転位は空孔の助けによって運動可能（転位の上昇運動）



多結晶材料の塑性変形

多結晶：多くの結晶粒がランダムな方向に配列

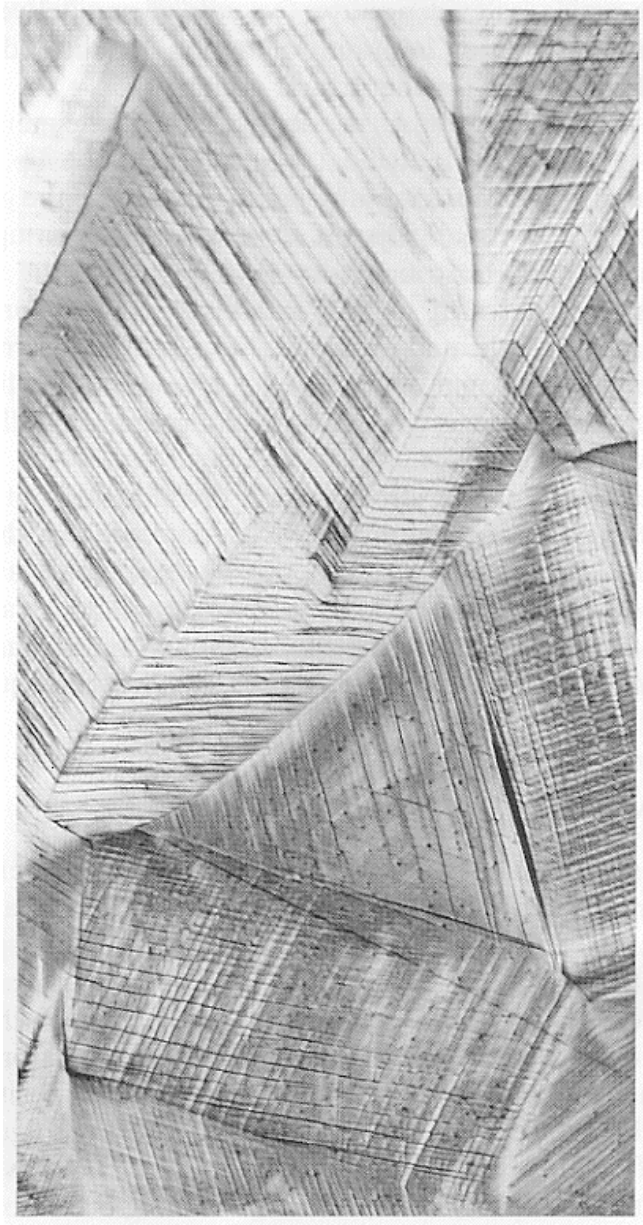
転位運動（すべり）は各々の結晶粒内の最も都合のよいすべり系に沿って起こる

塑性変形した銅多結晶の試料表面

互いに交差した2種類のすべり線

↓

2種類のすべり系の活動を示唆



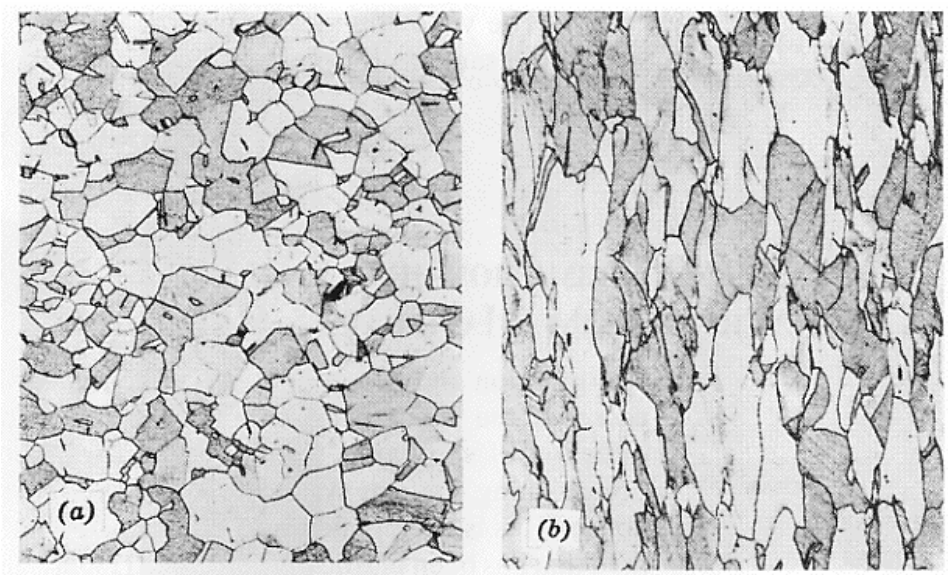
多結晶の塑性変形：すべりによる各結晶粒の相対的変形

○　金属のような延性材料の場合、結晶粒界の分離・開口は起こらない

○　多結晶全体が任意の形に変形するためには、個々の結晶粒が任意の形に変形し、結晶粒界での連続性を保つ必要あり

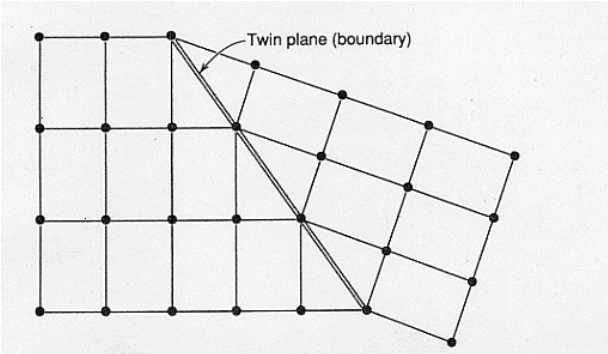
結晶を任意の形に変形させるには少なくとも5つの独立なすべり系が必要
（フォン・ミーゼスの条件）

多結晶の降伏には変形が多重すべりで起こることが必要



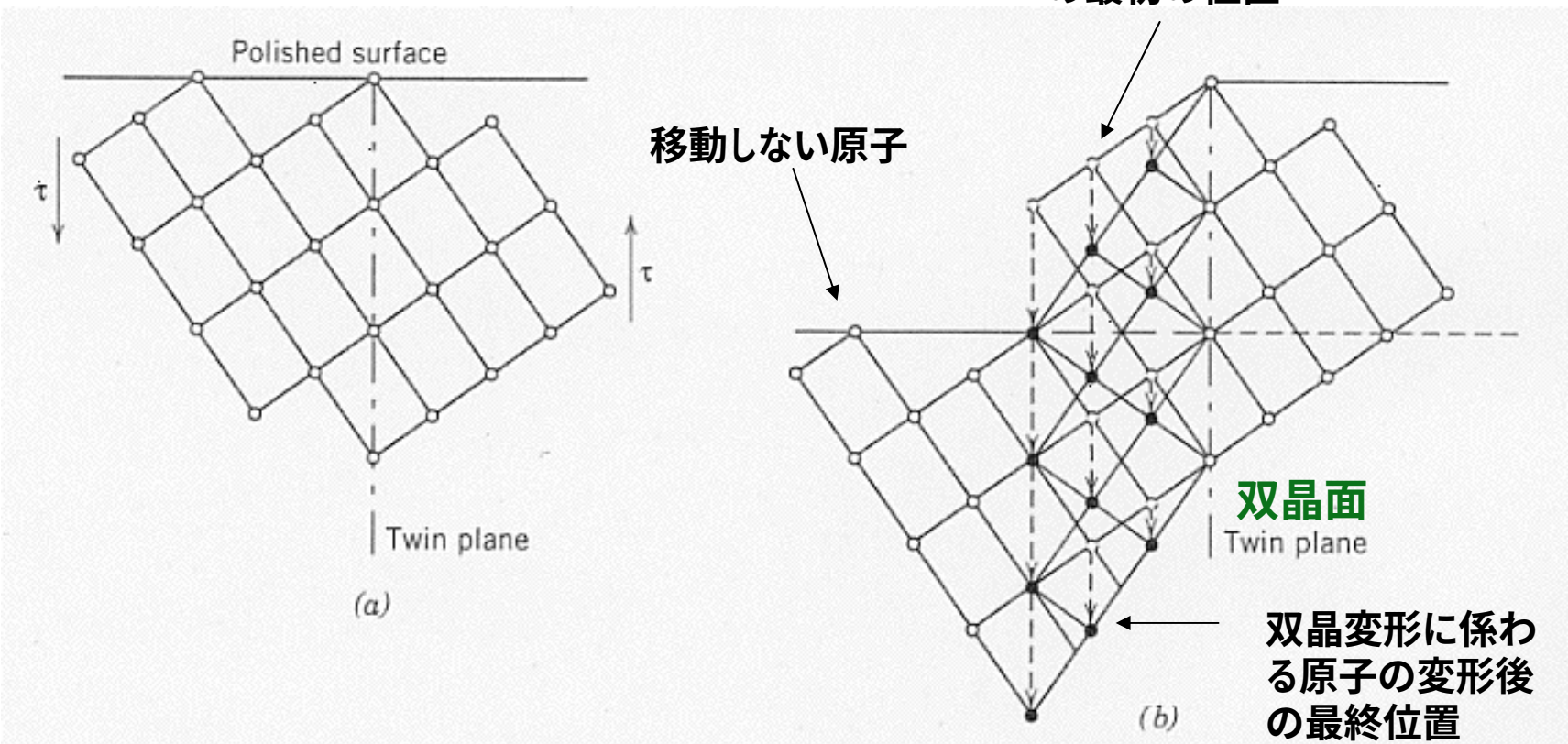
多結晶の降伏：変形しやすい方位をもつ結晶粒での塑性変形が
他の結晶粒へ伝播して生じる
個々の結晶粒は隣接結晶粒によって拘束
⇒ 単結晶より多結晶は強い（降伏応力が大きい）

双晶



双晶による変形

せん断力により結晶面の片側の原子配列がもう片側の原子配列に対して鏡像になるように原子が移動



双晶変形：結晶構造によって決まる特定の結晶面、方向に起こる

(例) BCC金属　双晶面　(112)、方向　[111]

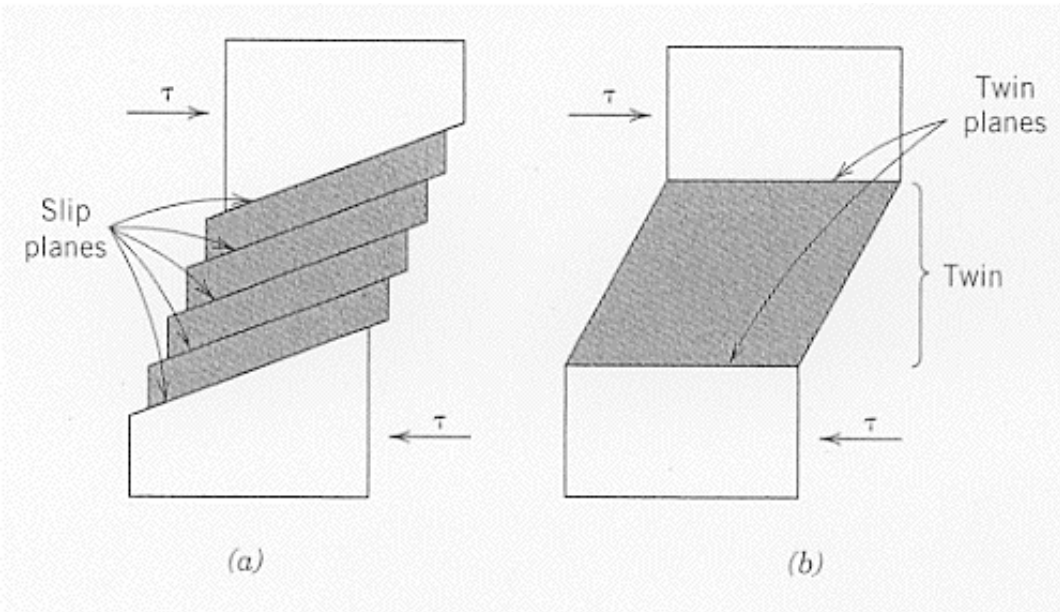
すべり変形と双晶変形の違い

すべり変形

・すべりステップ
・変形の前後で、すべり面の直上、直下の原子の方向は変わらない
・すべりの大きさは原子間隔の倍数

双晶変形

・双晶内でせん断変形は均一
・双晶面を境に原子の方向が変化
・個々の原子の変位は原子間隔よりも小さい



変形双晶は、BCC金属やHCP金属が、低温あるいは高速変形（衝撃負荷）する場合に発生

⇩

すべりが抑制される場合（活動できるすべり系がない場合）

双晶変形によって生じる塑性変形量は小さいが、双晶変形によって集団的に原子配列が変わるため、これによりすべり変形を起こしやすいすべり系が導入される場合がある

金属の強化機構

金属の力学的特性（硬さ、強度、延性、靭性）
互いにトレードオフの関係にあるのが一般的

強化機構に関する理解

⇕

金属の力学的挙動と転位運動の関係を知ること

○　巨視的な塑性変形は、転位の集団運動によって起こる
○　金属の塑性変形能は、転位の運動能力に依存する
○　硬さや強さ（降伏強さや引張強さ）は、塑性変形の起こりやすさと関連

すべての強化法は、「転位運動を拘束したり妨害すると金属材料はより硬く、強くなる」という原理に基づく

強化機構の種類

結晶粒微細化	単相金属･合金多結晶
固溶体強化	単相金属･合金
ひずみ硬化（加工硬化）	単相金属･合金
析出強化	多相合金
分散強化	多相合金
複合強化	多相金属･合金、複合材料

○　転位に対し、強い障害物と弱い障害物がある
○　転位に対し、長距離障害物と短距離障害物がある
○　強化機構の間に加算則が成り立つ場合とそうでない場合とがある
○　実用材料は同時に複数の強化機構を利用している

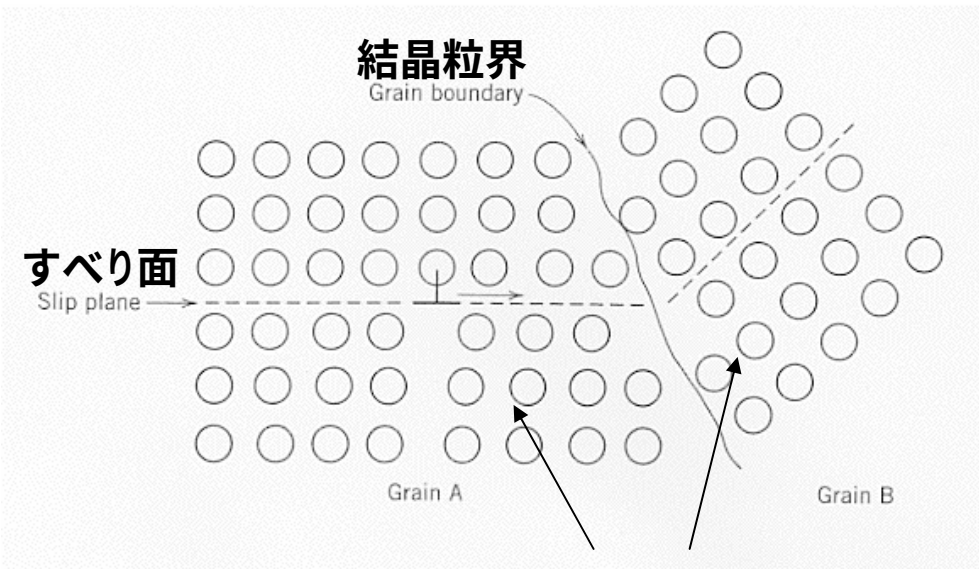
結晶粒微細化による強化

多結晶が塑性変形するには、隣接結晶粒へすべり（転位運動）が起こらなくてはならない

結晶粒界は転位運動の障害物

- 隣接結晶粒間の方位差
- 粒界での原子配列の乱れ

高傾角粒界では転位は粒界を通過できない。この場合は、粒界へ転位が堆積し、その結果引き起こされる応力集中によって隣接結晶粒内の転位源が活動することによってすべりが起こる。



異なった方位の隣接結晶粒

細かい結晶粒をもつ材料は、粗大な結晶粒をもつ材料よりも強い

⇩

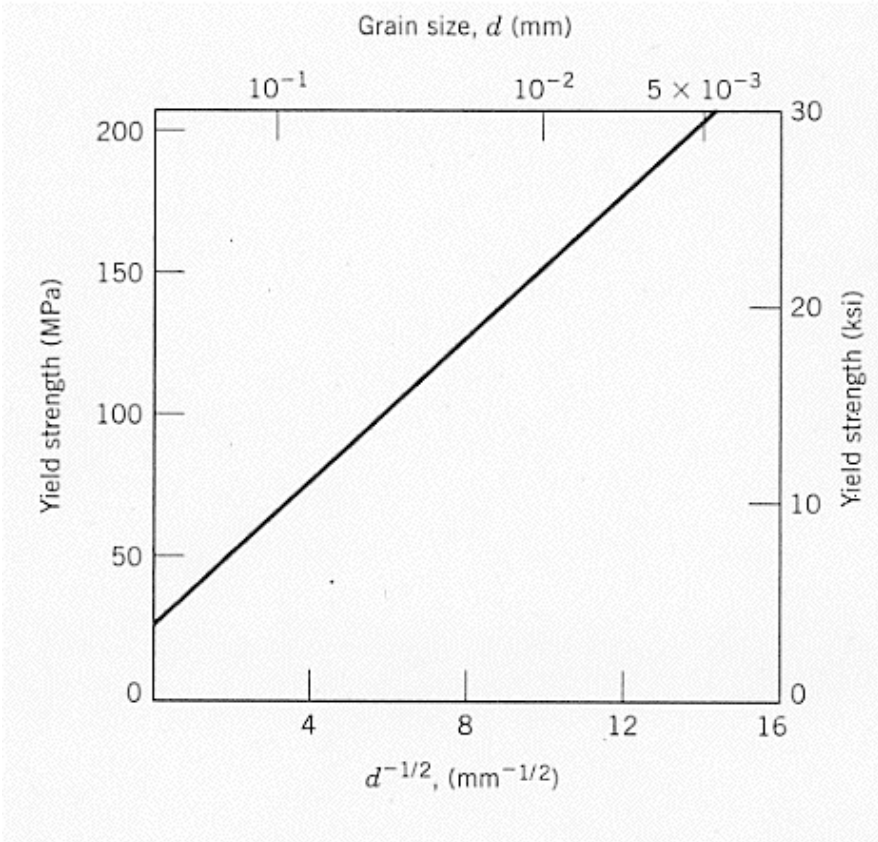
転位の障害となる結晶粒界の総量の違い

Hall-Petchの式

$$\sigma = \sigma_o + k_y d^{-1/2}$$

（σ_0、k_yは定数、dは結晶粒径）

- 結晶粒径は凝固速度や加工とその後の熱処理によって調整可能
- 結晶粒微細化により延性、靭性も向上
- 低傾角粒界はすべりの障害にならない
- 双晶境界はすべりに対し効果的な障害物

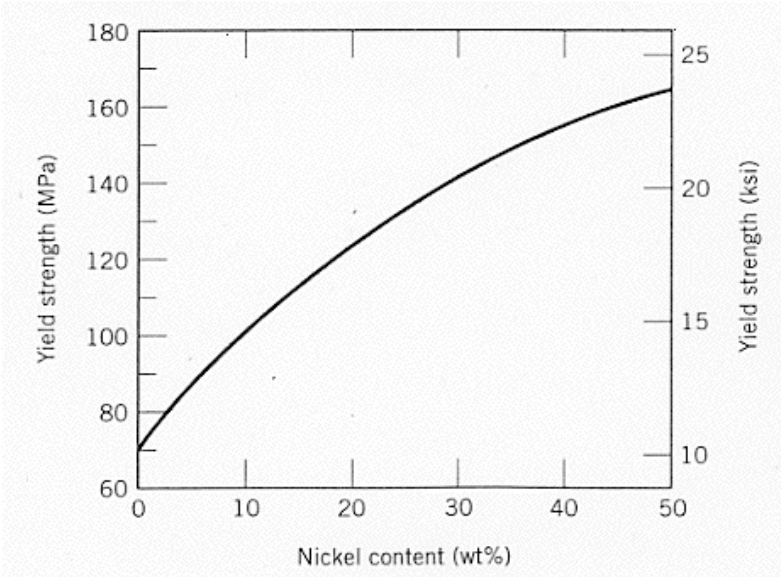


Cu-30%Zn合金の降伏応力の結晶粒径依存性

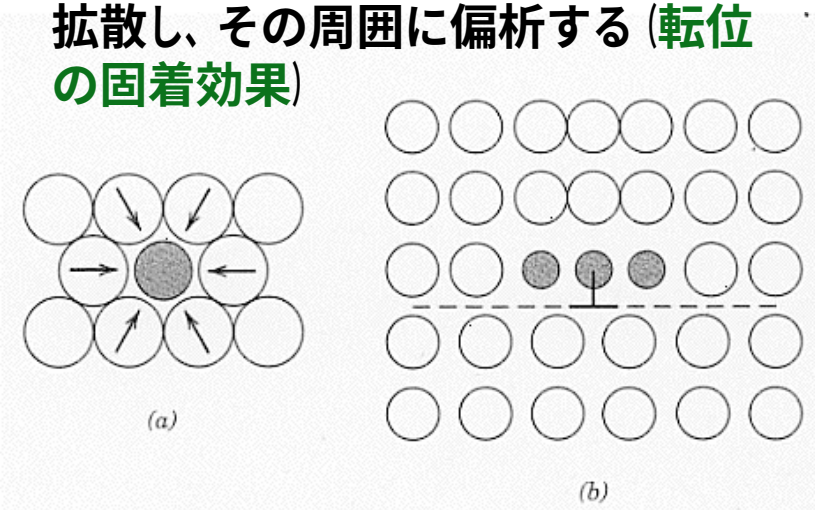
固溶体強化

侵入型固溶体あるいは**置換型固溶体**をつくる不純物原子を合金化し、金属を強化する方法

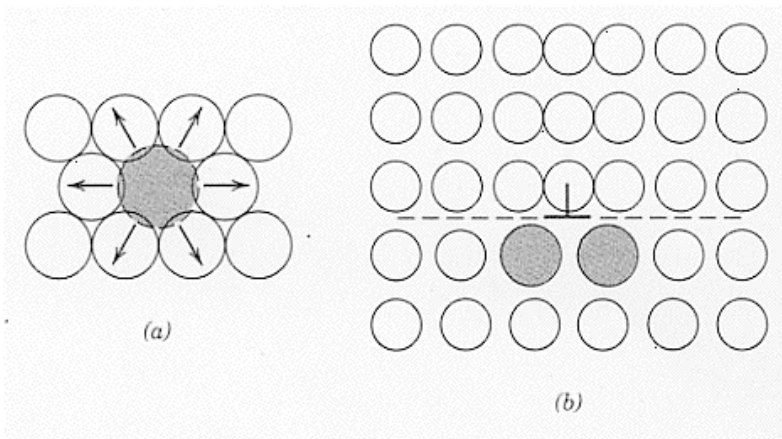
- 不純物原子が周囲のマトリックス原子に**格子ひずみ**をもたらす
- 転位と不純物原子に起因する**格子ひずみ場の相互作用**が転位運動を阻害する
- 転位の周囲の格子ひずみを打ち消すために不純物原子は転位に向かって拡散し、その周囲に偏析する（**転位の固着効果**）



Cu中へのNiの固溶量と降伏応力の関係



小さな不純物原子の場合



大きな不純物原子の場合

ひずみ硬化

延性的な材料が塑性変形したとき、より硬く、強くなる現象

ほとんどの金属は室温でひずみ強化する
通常の室温での変形は冷間加工に分類されるので、加工硬化ともいう

塑性変形の程度を冷間加工率 (%CW) で表わす

$$\%CW = \{(A_0 - A_d) / A_0\} \times 100$$

A_0 :初期断面積、A_d :変形後の断面積

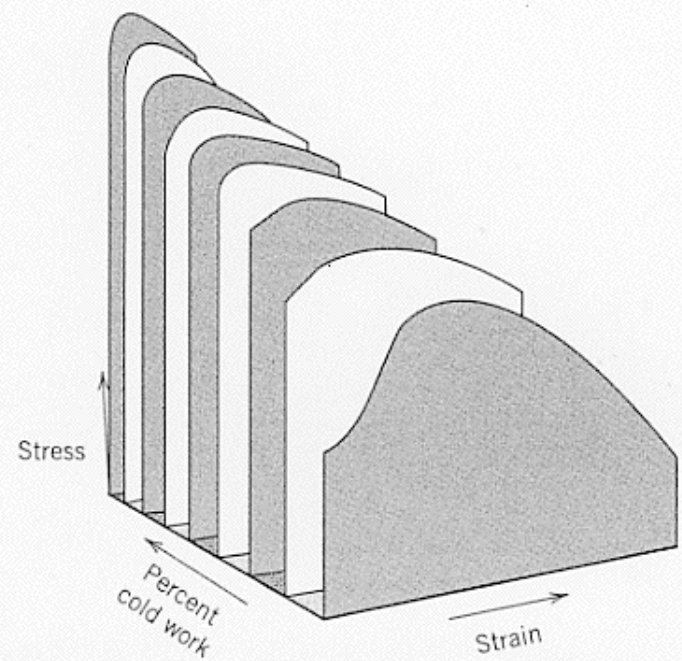


FIGURE 7.20 The influence of cold work on the stress–strain behavior for a low-carbon steel. (From *Metals Handbook: Properties and Selection: Irons and Steels,* Vol. 1, 9th edition, B. Bardes, Editor, American Society for Metals, 1978, p. 221.)

冷間加工により降伏強さ、引張強さは増大し、延性は低下する

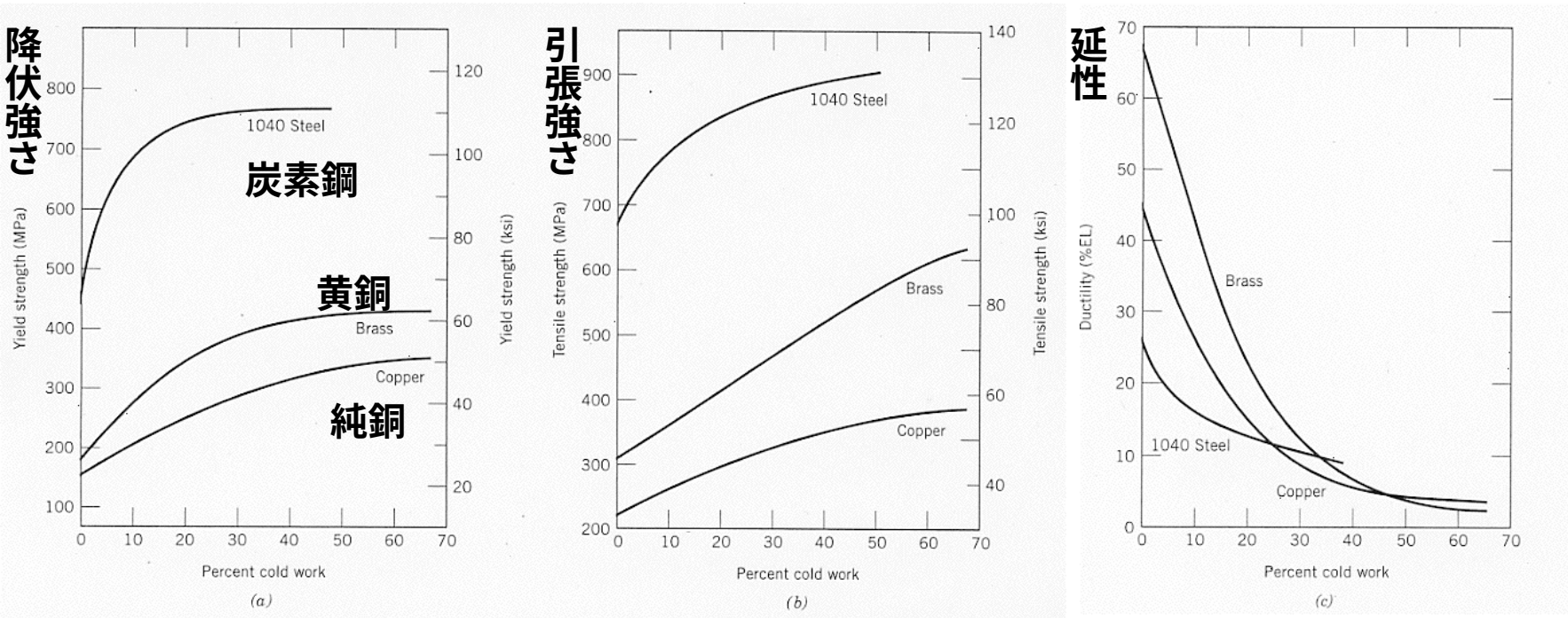
金属の変形中（冷間加工中）に転位は増殖し、転位密度が増加

↓

転位間の間隔が減少

↓

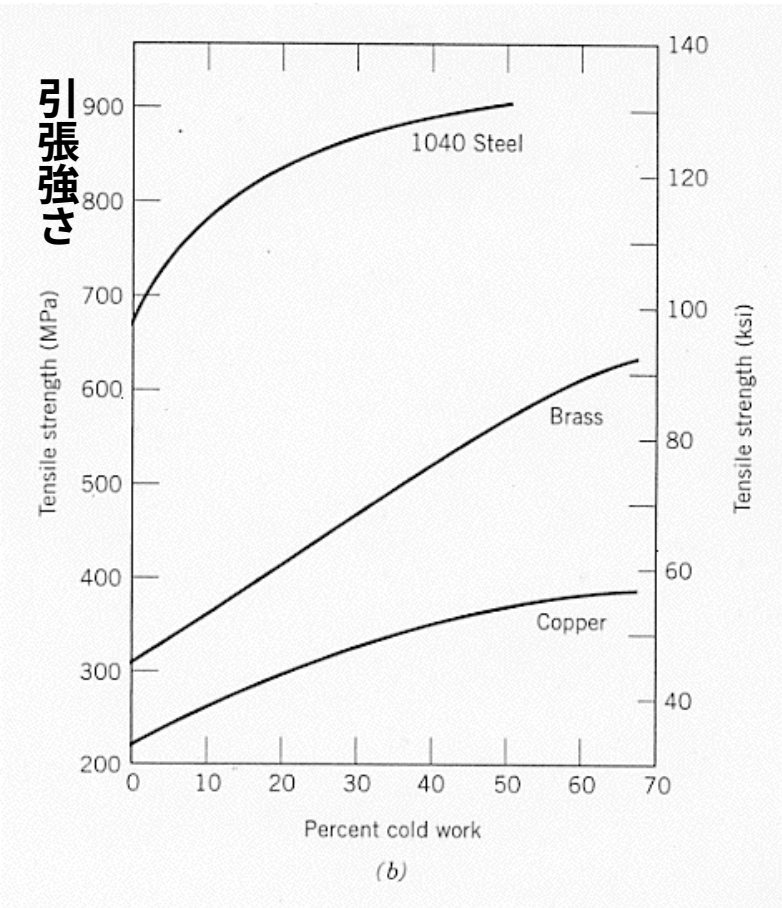
転位間のひずみ相互作用（平均すると反発）により、転位運動は他の転位により妨げられる



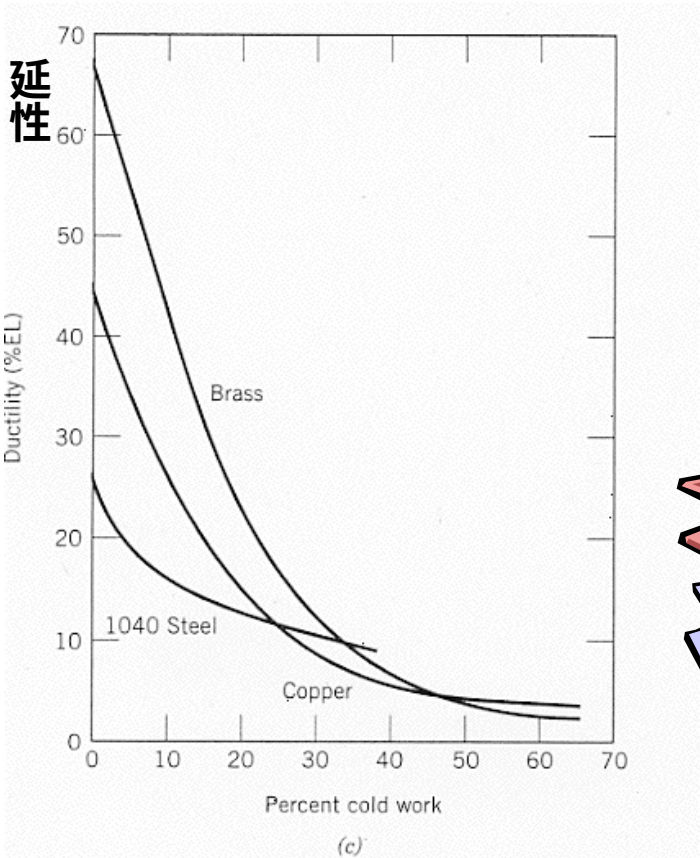
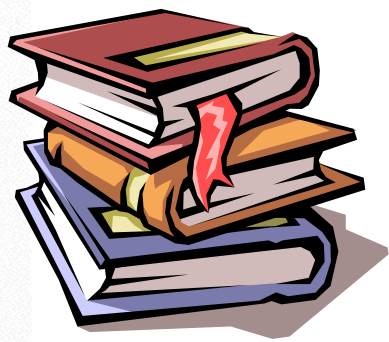
冷間加工率　　冷間加工率　　冷間加工率

演習問題

円柱状の純銅の棒を冷間加工し、その径を15.2 mm**から**12.2 mm**に減少させた。引張強さと延性** (%EL) **を求めよ。**



冷間加工率



冷間加工率